

課題番号 3RF-1801

課題名

マイクロ波加熱を利用した未利用バイオマスの 高速炭化システムの開発

重点課題 主：

【重点課題⑪】バイオマス等の廃棄物からのエネルギー回収を推進する技術・システムの構築

研究代表機関名 東京工業大学物質理工学院

研究代表者名 椿 俊太郎

研究実施期間 平成31年度-令和2年度

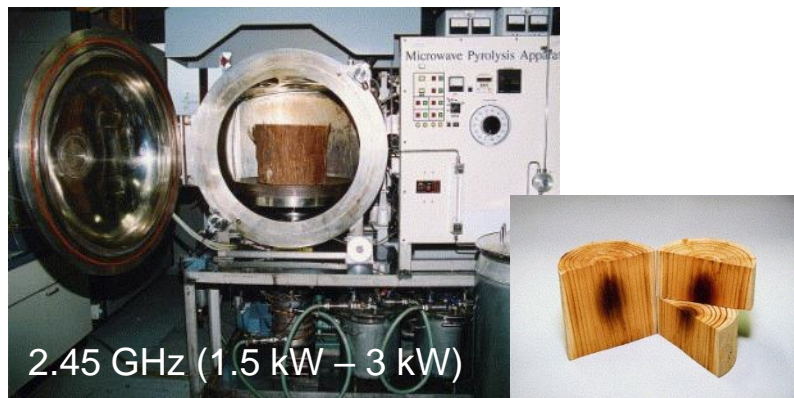
1. 研究背景① マイクロ波加熱による急速熱分解

1. 反応の低温化: 500°C以上 → 200°C程度 (活性化エネルギーの低減)
2. 炭素生成物の質の向上: 固体生成物の発熱量、比表面積の増大
3. タール生成の減少: 配管閉塞の低減

Luque et al., Microwave-assisted pyrolysis of biomass feedstocks the way forward? *Energy and Environmental Science*, 2012, 5, 5481
Huang et al., A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass, *Sustainable Environment Research*, 2016, 103-109

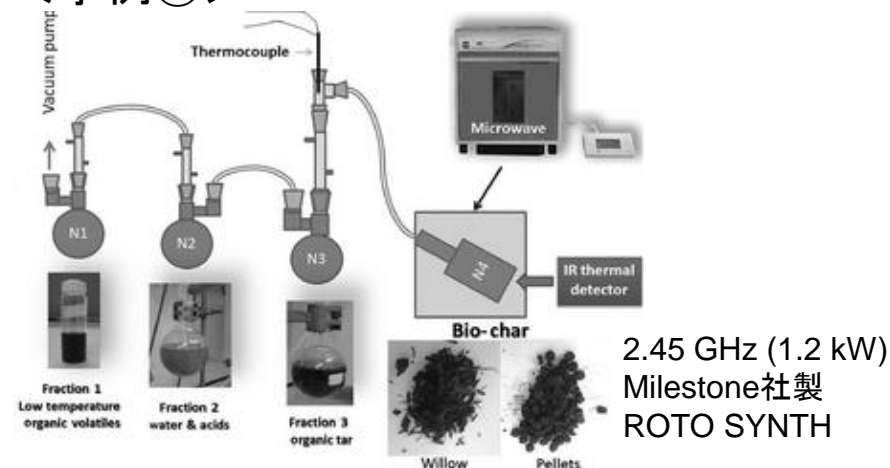
マイクロ波を用いた急速熱分解の事例

<事例①>



Miura et al., *J. Anal. Appl. Pyrol.* 2004

<事例②>



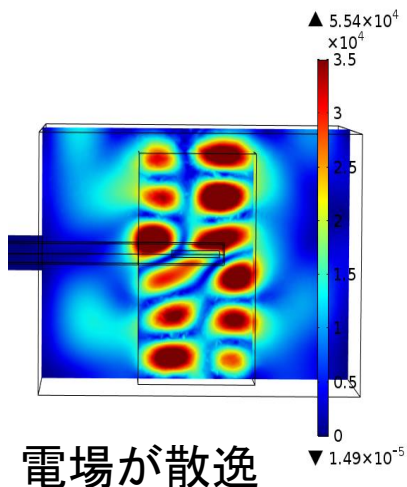
Gronnow et al., *Bioenergy*, 2013

高出力なマグネトロンを使用・熱媒体として炭素やSiCを使用するため
バイオマス高選択的な物質加熱は不十分・昇温速度:10-200 °C/min ²

1. 研究背景② マイクロ波加熱技術の革新

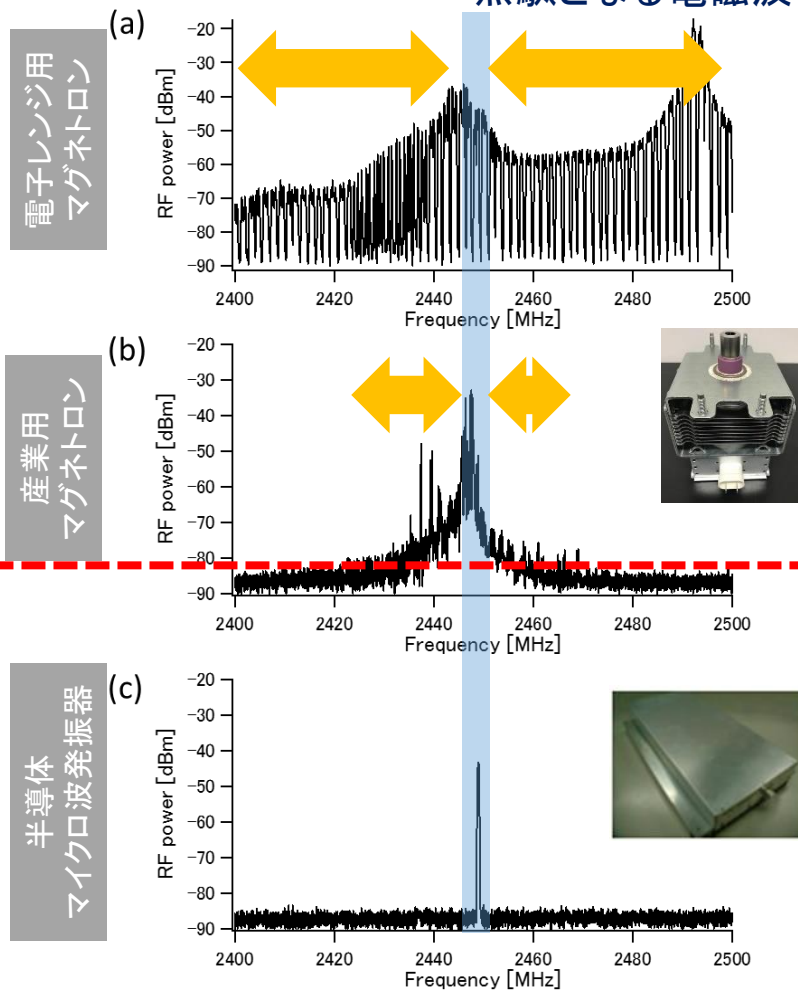
シングルモード共振器

マルチモードキャビティ

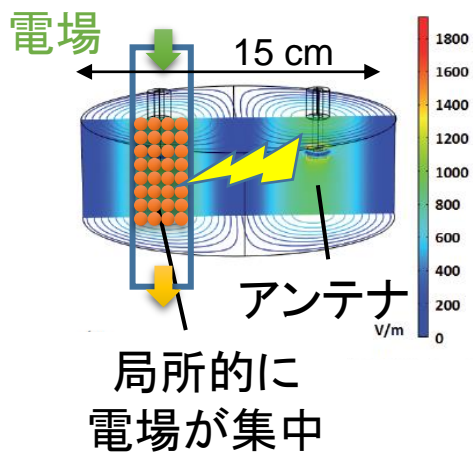


半導体マイクロ波発振器

無駄となる電磁波



シングルモードキャビティ

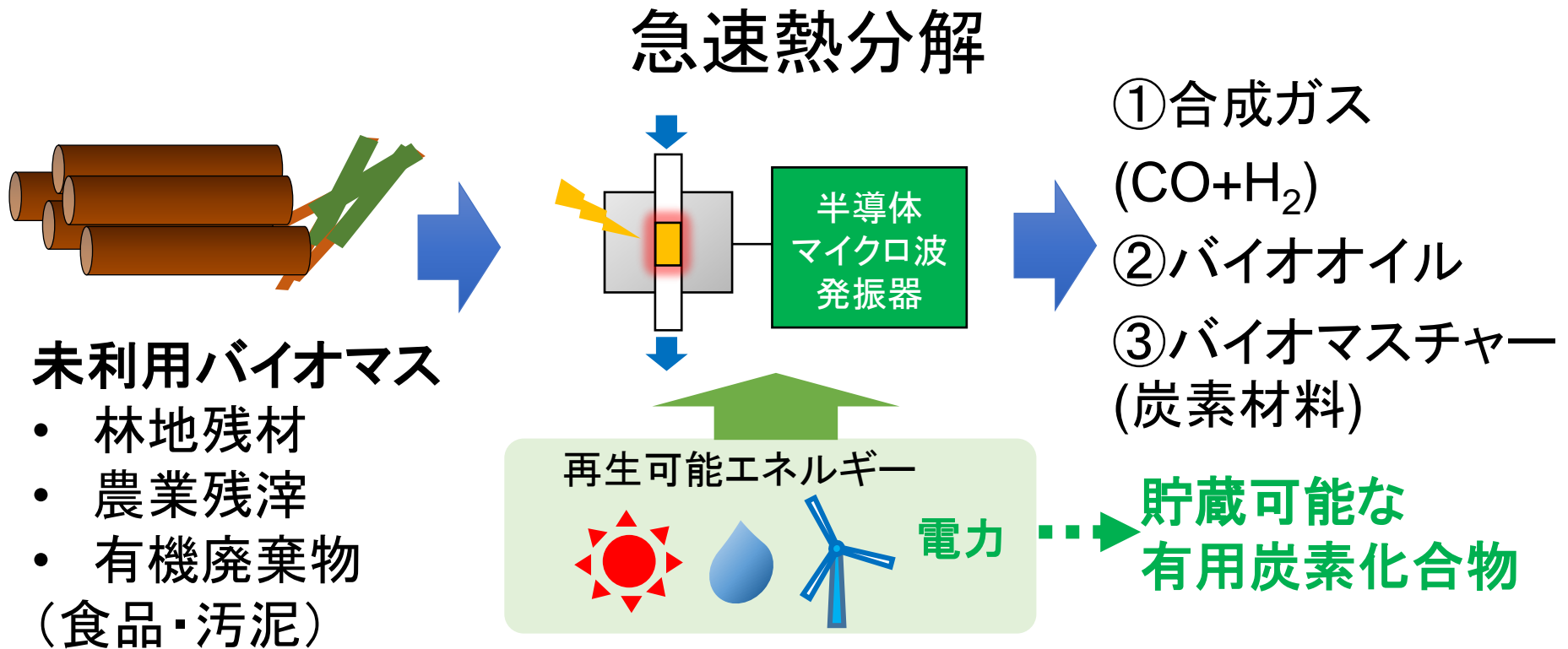


TM₁₁₀モード



半導体発振器 = 高精度・周波数可変

2. 研究開発目的

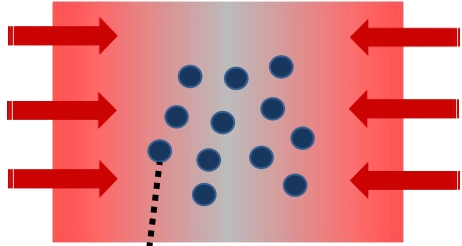
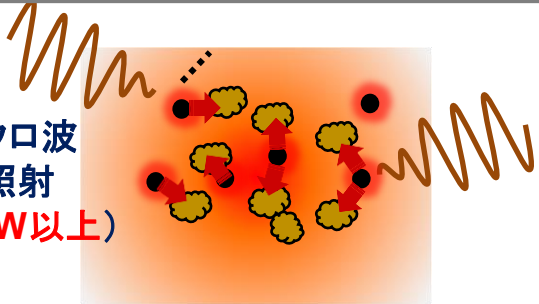
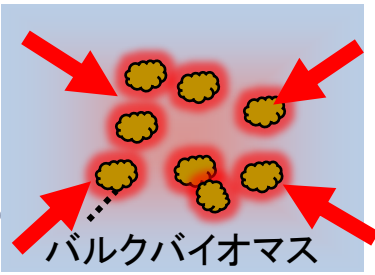


半導体発振器による**精密制御**によりマイクロ波を**高密度化**し
低誘電損率試料を急速加熱

[tan δ] セルロース ; 0.042、リグニン ; 0.018、イナワラ ; 0.029

3. 研究開発目標

革新的マイクロ波技術による従来の急速熱分解の改善

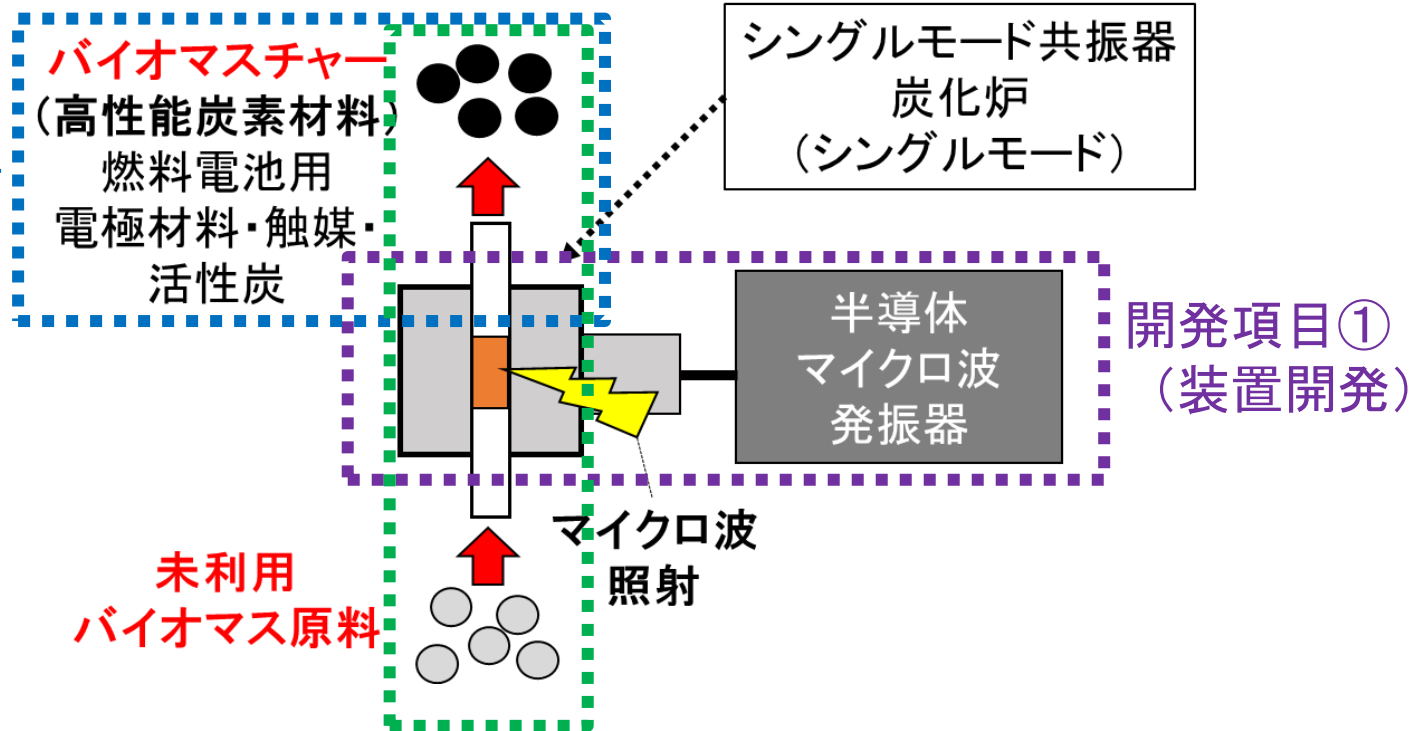
外部加熱(伝熱)	マイクロ波(従来法)	マイクロ波(半導体) 本課題
 <p>微粉碎・乾燥バイオマス</p> <ul style="list-style-type: none"> 熱媒体との接触により加熱 バイオマスの低熱伝導性・含水量が課題 	 <p>マイクロ波照射 (数kW以上)</p> <ul style="list-style-type: none"> 炭素やSiCをマイクロ波吸収剤かつ熱媒体として利用 	 <p>バイオマスにマイクロ波を直接照射 (数十~200W)</p> <p>バルクバイオマス (500°C)</p> <ul style="list-style-type: none"> バイオマスを直接加熱 律速となる熱伝導を回避
<p>炉温度 500°C-1000°C</p>	<p>キャビティ温度 >500°C</p>	<p>反応場 500°C以上 キャビティ 室温</p>
<p>Slow: 0.1-1 K/s, 450-550 s Fast: 10-200 K/s, 0.5-10 s Flash: 1000 K/s, 0.5 s</p>	<p>10 K/min ~ 200 K/min</p> <p>たとえばWang et al., J. Anal. Appl. Pyrol. 119, 104-113 (2016)</p>	<p>1000 K/min (応募当初の開発目標)</p>
<p>電気炉を使用 炉体: 大 消費電力: 大</p>	<p>炉体(マグネトロン): 大 消費電力: 大 (可動式には不向き)</p>	<p>炉体(半導体): 小(可動式) 消費電力: 小 高速起動・停止(電力変動に強い)</p>

4. 研究開発内容

【研究開発項目】

1. 半導体マイクロ波炭化炉の設計・開発
2. 半導体マイクロ波炭化炉を用いた各種バイオマスの炭化反応、および炭化物の特性(炭素含有量・比表面積・導電性)の評価
3. 半導体マイクロ波炭化炉のフローシステム化

開発項目②
反応挙動および
生成物の性能評価

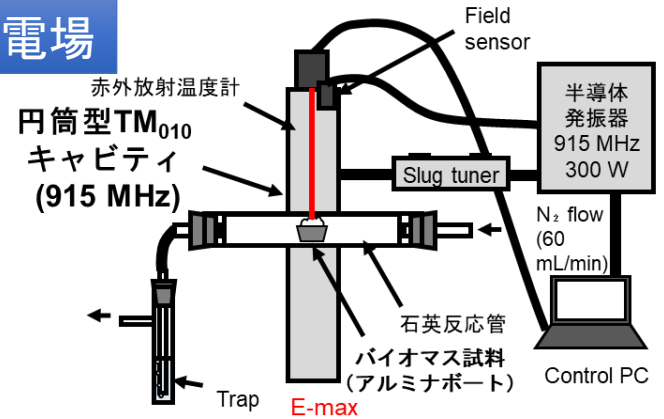


開発項目③ システム最適化

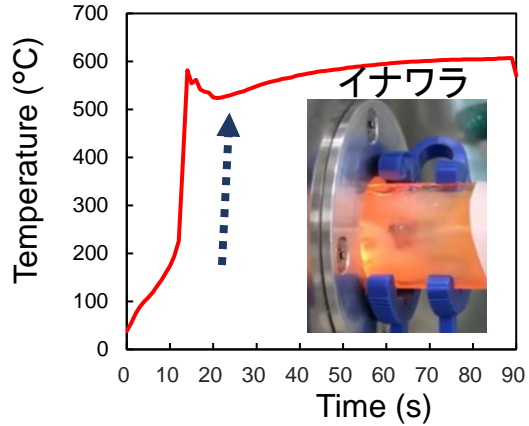
5. 研究成果(研究成果の概要)

1) 半導体マイクロ波炭化炉の開発

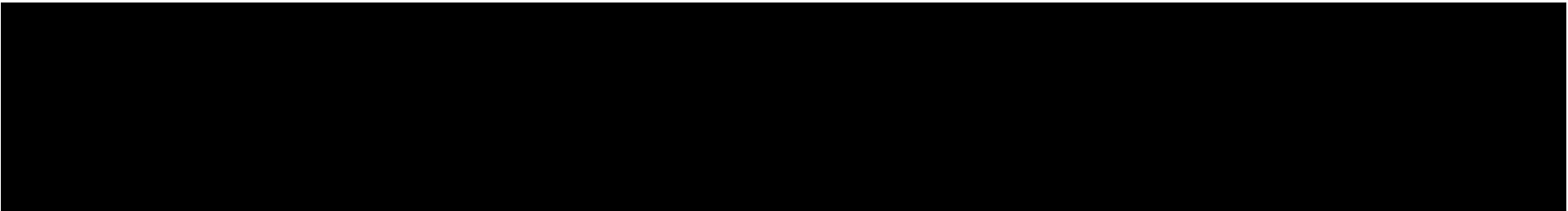
電場



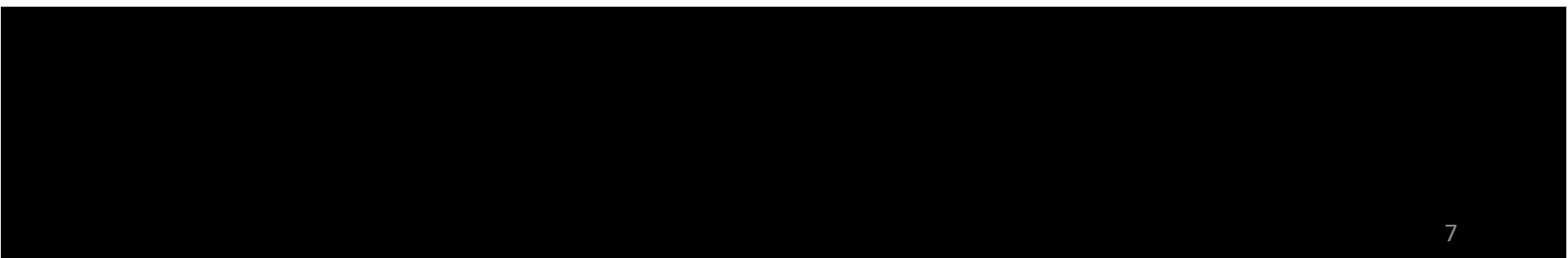
Max: 330 °C/sec



2) 半導体マイクロ波炭化炉によるバイオマスの炭化反応の検証



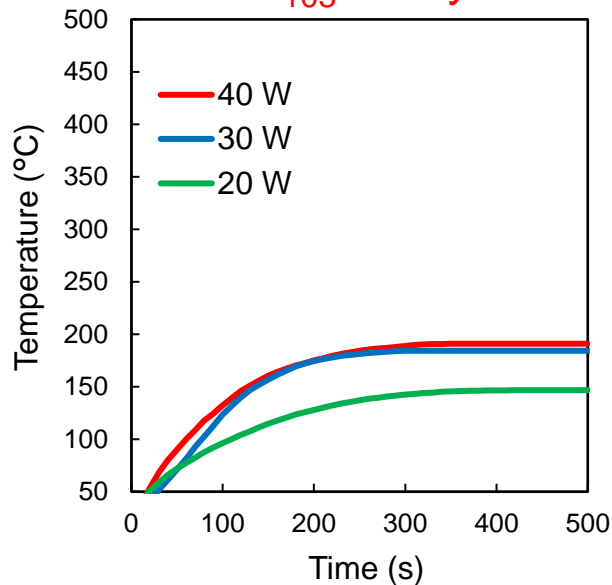
3) 半導体マイクロ波炭化炉のフローシステム化



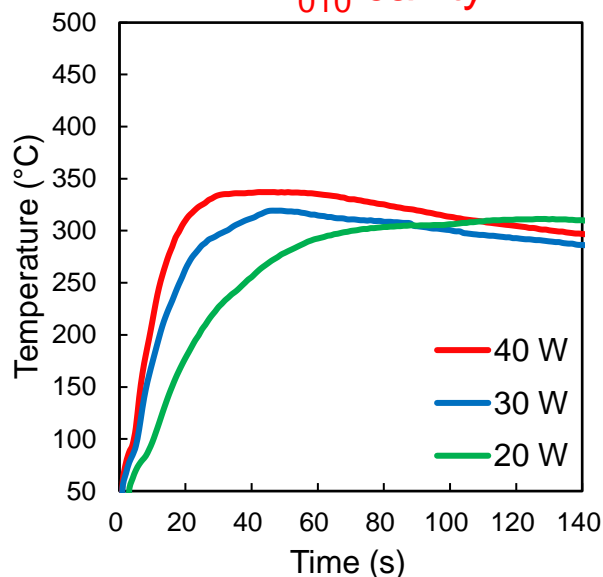
1) 半導体マイクロ波炭化炉の開発

モデル化合物(セルロース)の加熱挙動

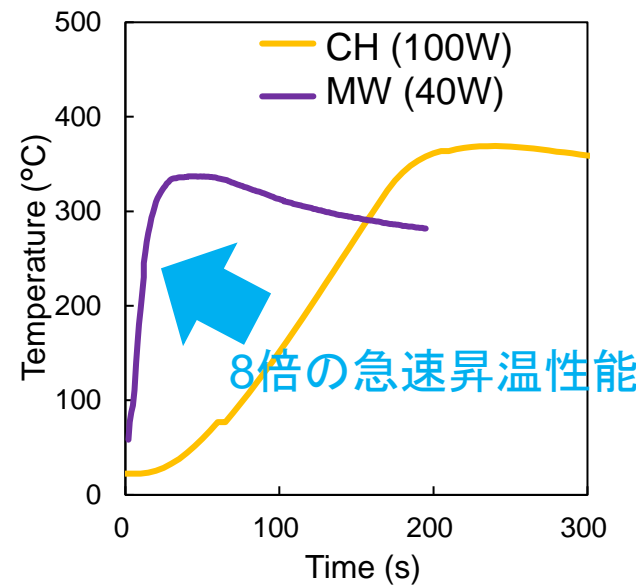
従来のマイクロ波
TE₁₀₃ cavity



本課題のマイクロ波
TM₀₁₀ cavity



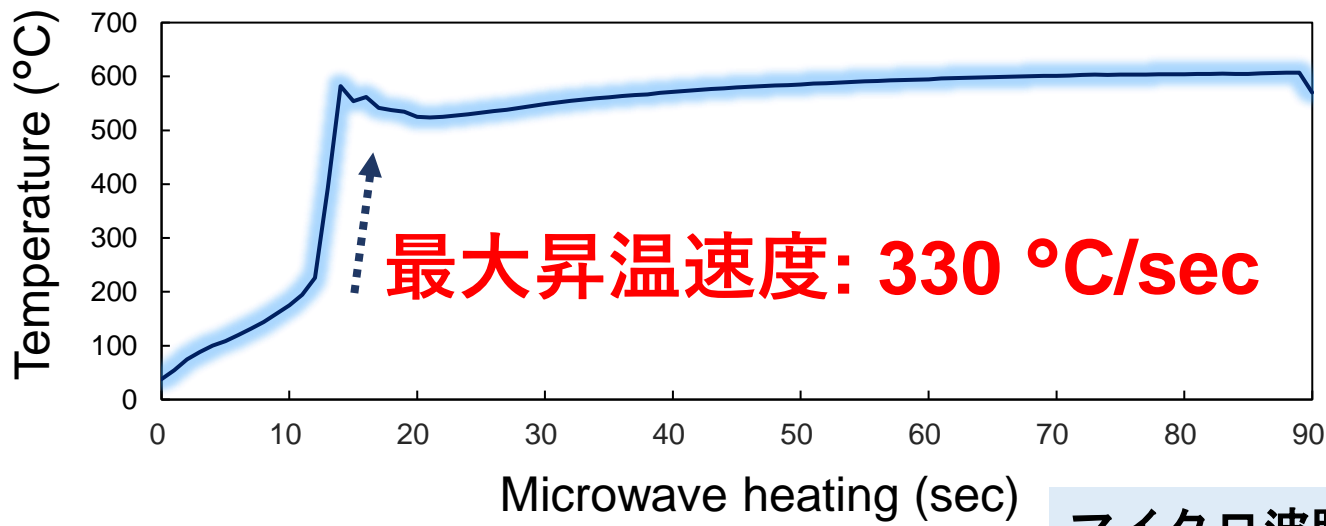
電気炉加熱との比較



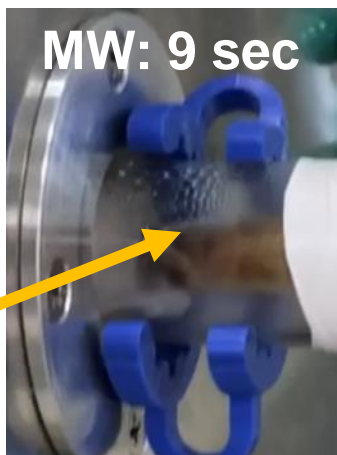
- ❑ 従来法（マイクロ波）では200秒加熱した場合の180°C程度
- ❑ 半導体式マイクロ波では30秒で熱分解に必要な320°Cに到達
- ❑ 半導体式マイクロ波加熱の平均昇温速度：960°C/min
- ❑ 電気炉加熱の平均昇温速度：120°C/min

1) 半導体マイクロ波炭化炉の開発

イナワラの急速熱分解



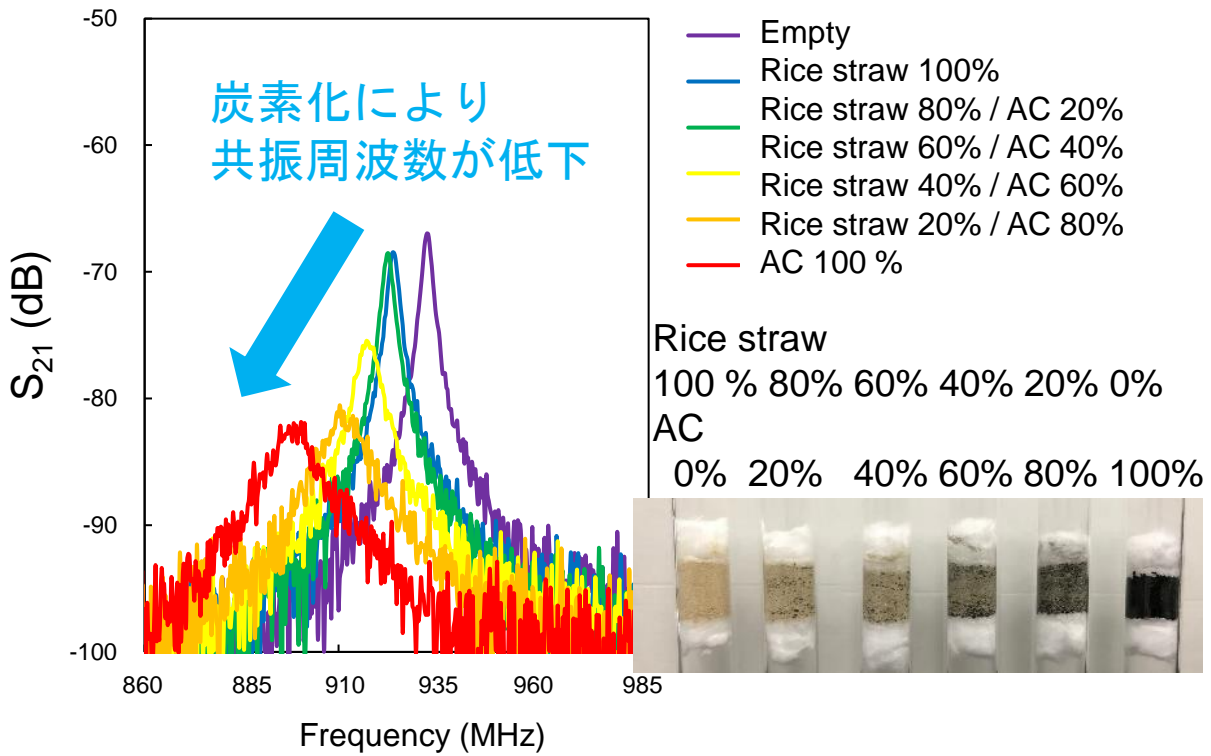
マイクロ波照射条件：
915 MHz・200 W



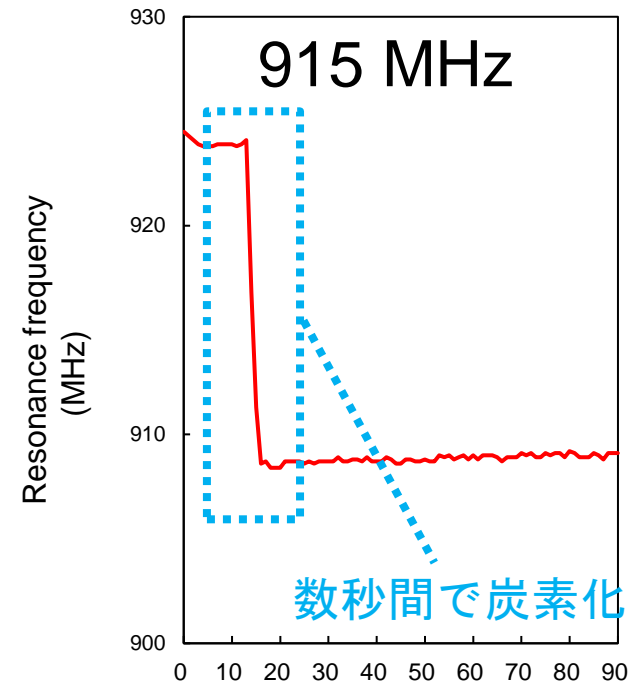
1) 半導体マイクロ波炭化炉の開発

イナワラの急速熱分解

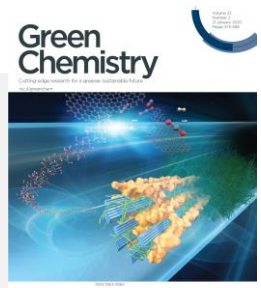
共振周波数 (S_{21}) 測定



共振周波数変化



- 共振周波数：2.45 GHzでは大きく変化、915 MHzでは変化がスムーズ
- 炭素化の進行に伴い共振周波数が低下
- 915MHzでは数秒間の間に炭素化が完了



5-2. 環境政策への貢献

本課題

1. 新しいマイクロ波半導体発振器の有効性を実証 (最大昇温速度 330°C/sec)
2. 迅速な急速熱分解により、熱分解ガス、タール、炭素材料に分離
3. スケールアップの可能性を実証

小型・分散バイオマス処理

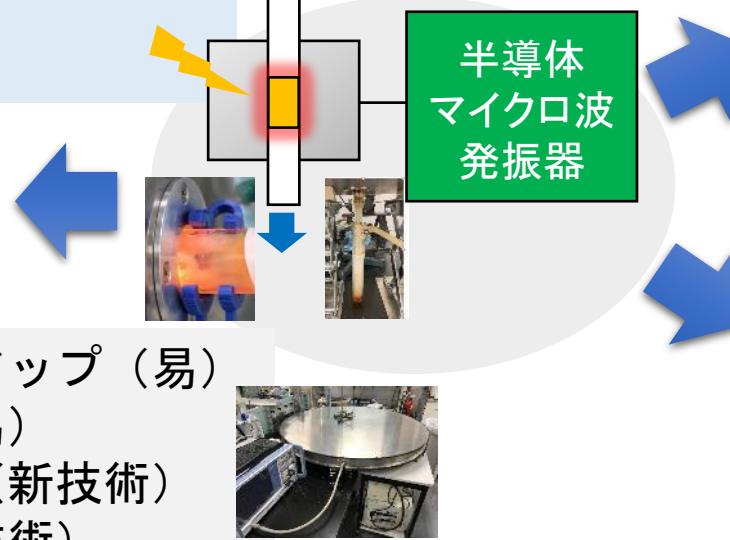
- 高付加価値産物 (竹酢液・炭素)
- 分散型BECCS
- 地域への水素供給

今後の課題

現状 10 g / 2 min
スケール 1 t/day

大容量化 : ナンバリングアップ (易)
大容量化 : 高周波加熱 (易)
大容量化 : 空間電力合成 (新技術)
高出力化 : 注入同期 (新技術)

コア技術 (本課題)



産業電化

- Power to X
- 再エネを物質に変換

マイクロ波発振効率 向上

915MHz (90%)	>	2.45GHz (70%)
--------------	---	---------------

廃棄物処理装置

- 医療廃棄物
- プラスチック廃棄物
- 汚泥



5-3. 研究目標の達成状況

1) 半導体マイクロ波炉開発

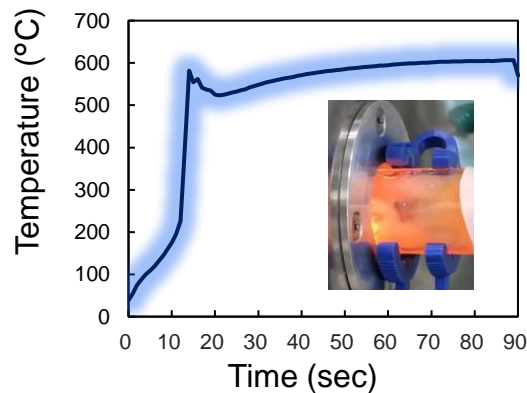
目標

省電力のマイクロ波で、バイオマスを1000°C/minで高速で炭化

到達度

1. 半導体炭化炉を開発
2. 目標 1000°C/minを達成
3. 電場・磁場を効果的に利用

**Max: 330 °C/sec
(19,800°C/min)**



2) バイオマスの炭化反応

半導体マイクロ波炭化炉による炭化物の特性評価

3) フローシステム化

- 炭化プロセスのフローシステム化
- 連続的にバイオマスを共振器内に導入し、炭化物を生成

達成状況

目標を大きく上回る成果

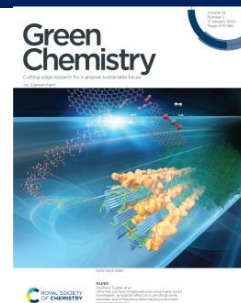
目標を大きく上回る成果

目標を達成

6. 研究成果の発表状況

<査読付き論文> 全1件

1. S. Tsubaki, Y. Nakasako, N. Ohara, M. Nishioka, S. Fujii, Y. Wada, Ultra-fast pyrolysis of lignocellulose using highly tuned microwaves: Synergistic effect of cylindrical cavity resonator and frequency-auto-tracking solid-state microwave generator, **Green Chem.**, 22, 342-351, 2020 (Press Release 2019/11/25, Highlighted in Outside Front Cover, **IF:9.480**).



<その他誌上発表(査読なし)> 全2件

1. 椿 俊太郎, 西岡 将輝, 和田 雄二. 半導体式マイクロ波装置を用いたバイオマスの「超」急速熱分解, クリーンエネルギー, Vol. 29, No. 9, pp. 55-61, 2020.
2. 椿俊太郎. 電磁波照射効果を「見る」-「その場」観察を駆使した電磁波駆動化学の理解, 化学と工業, Vol. 73, No. 3, pp. 238-239, 2020.

<学会発表(学会等)> 全6件

1. S. Tsubaki, M. Nishioka, N. Ohara, Y. Wada: "Rapid microwave-assisted pyrolysis of lignocellulose by the solid-state microwave generator", The 8th Asian Conference on Biomass Science 2020, Japan Institute of Energy, On-line 2021.
2. 椿俊太郎, 小原則子, 西岡将輝, 和田雄二: 第29回日本エネルギー学会大会, (2020), 「マイクロ波急速加熱を用いたリグノセルロースの熱分解反応」

<「国民との科学・技術対話」の実施> 全2件

1. MWE2020 マイクロウェーブ展 ワークショップ TH4B-3 若手研究者が主導する次世代マイクロ波加熱応用(主催:電子情報通信学会 APMC国内委員会、2020年11月26日オンライン 聴講者 約80名)にて「マイクロ波による触媒反応促進効果の理解とその応用」とのタイトルで講演
2. 第3回 産総研化学研究シンポジウム(2019年11月23日、つくば 産業技術総合研究所 聴講者64名)にて、「電磁波で操る化学反応」について講演

<マスコミ等への公表・報道等> 全3件

1. 財経新聞(2019年11月28日)、「東工大、マイクロ波によるバイオマスの超急速熱分解に成功 低炭素社会実現に期待」
https://www.zaikei.co.jp/article/20191128/541569.html?utm_source=news_pics&utm_medium=app

<本研究費の研究成果による受賞> 全3件

1. **The Excellent Paper Award (Oral Presentation)**, "Rapid microwave-assisted pyrolysis of lignocellulose by the solid-state microwave generator", The 8th Asian Conference on Biomass Science 2020, Japan Institute of Energy, On-line, January, 2021.
2. **2020年度日本エネルギー学会 進歩賞(学術部門)** 「マイクロ波を用いた高効率バイオマス変換プロセスの開発」令和2年
3. **日本エネルギー学会 第14回バイオマス科学会議 ポスター賞** 2019年1月17日(於、東広島芸術文化ホールくらら)